干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

中国制造业碳排放时空演变及驱动因素研究①

王　霞[1,2]，　张丽君[1,2]，　秦耀辰[1,2]，　张晶飞[1,2]
（1　河南大学环境与规划学院，河南　开封　475004；
2　黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室，河南　开封　475004）

摘　要：据2006—2015年间制造业能源消费数据核算中国大陆30个省（除港澳台、西藏外）的制造业碳排放，并依据要素密集度将制造业划分为资金、技术、劳动力密集型3类。在分析制造业以及不同类型制造业碳排放时空演变基础上，运用Kaya模型将碳排放驱动因素划分为经济规模、产业结构、能源强度、能源碳强度4个方面，并运用LMDI-I分解模型定量分析碳排放的驱动因素。结果表明：除北京外，其余省域制造业碳排放均呈现不同程度的增长；资金密集型制造业碳增长最高，其次是技术、劳动力密集型制造业；经济规模扩大是导致各省、各类型制造业碳增长的首要因素；产业结构调整、能源强度与能源碳强度的变化在各省、各类型制造业碳排放中呈现双向效应，且作用强度差异显著。因此，在未来，各省、各类型制造业碳减排措施应各有侧重。

关 键 词： 不同类型制造业；碳排放；LMDI-I方法；中国
文章编号：

国务院印发的《中国制造2025》中明确指出将绿色发展理念融入制造业生产中，推动绿色经济成为21世纪经济持续健康发展的主导形态[1]。实现绿色制造、绿色发展，务必要处理好制造业经济效益与碳排放之间的关系[2]。制造业是一个国家和地区经济实力和综合竞争力的重要标志，如何保证制造业经济效益在不断提高的同时实现低投入、低消耗、低排放的集约式发展模式已成为国内外学者研究的焦点。此外，中国政府承诺在2030年左右实现碳排放峰值[3-5]，这不仅是中国低碳经济发展的最大外部压力[6]，也使得探索制造业低碳、绿色发展变得更为紧迫。

当前国内外就制造业碳排放研究主要聚焦于三个方面：（1）制造业碳排放核算。核算方法包括碳排放系数法[7]、投入产出法[8-9]、消费品生命周期等方法。其中，碳排放系数法能够较为直观地反应制造业能源依赖转变对碳排放的影响，故本文选择此方法对制造业碳排放进行核算。（2）制造业碳排放影响因素研究。因素的选取涉及经济[10]、政策[11]、对外贸易[12]、技术[13]等规模与结构方面。方法上则以分解与计量模型为主，分解模型涉及Divisia分解法[14]、LMDI分解法[15-17]、IO-SDA分解法[18-19]等。计量模型以传统多元线性回归模型[20-22]与SDM模型[23]居多。考虑到LMDI分解模型具有时间可塑性强、没有残差、能处理零值与负值等优点[24]，且普适性较高，因此，本文采用LMDI分解模型对制造业碳排放驱动因素进行研究。（3）制造业碳排放预测与达峰。预测基于基准情景、绿色发展情境、技术突破情境[16]等方面开展，且不同情景模式下碳排放、碳达峰皆有差异。

然而，上述研究均将整个制造业视为研究主体，未关注其内部行业间异质性特征。而不同类型的制造业碳排放存在显著差异，且同一驱动因素对不同类型制造业碳排放作用方向与强度均有不同。但目前，按要素密集度将制造业划分类型，并对其碳排放及驱动因素的研究还相对薄弱。然而，在工业化背景下对制造业以及不同类型制造业碳排放及其驱动因素作用方向与强度进行横向比较，有助于实施具体的、科学的制造业碳减排措施。

鉴于此，为使研究更具针对性，本文依据要素密

①　**收稿日期：**2019－01－13；　**修订日期：**2019－06－10
基金项目：国家自然科学基金项目（41501588，41671536）；中国博士后基金项目（2016M600575）；河南省哲学社会科学规划项目（2014CJJ065）资助
作者简介：王霞（1993－），硕士生研究生，主要从事低碳经济与可持续发展. E-mail：wxia0709@163.com
通讯作者：张丽君，博士，讲师，主要从事区域可持续发展，低碳生态城市. E-mail：zlj7happy@163.com

集度将制造业划分为资金、技术与劳动力密集型 3 类。并据能源消费数据,采用 IPCC 碳排放系数法核算 2006—2015 年间中国省域制造业碳排放,并分析快速工业化背景下制造业、不同类型制造业碳排放时空演变特征。在此基础上,运用 LMDI 加法数量分解模型定量分析在绿色制造推进过程中制造业、不同类型制造业碳排放驱动因素的作用方向与强度,再依据因素作用强度的省域差异提出不同的碳减排对策,以便进一步推进制造业绿色发展以及工业低碳化转型升级。

1　数据来源和研究方法

1.1　数据来源与处理

研究所涉及的数据主要包括 2006—2015 年间中国 30 个省域(除港澳台、西藏外)的制造业各行业能源消费量、经济总产值。数据来源于《中国能源统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、各省份统计年鉴和统计公报。据《中国能源统计年鉴》,2006—2011 年间制造业共 30 个行业,而 2012—2015 年间为 31 个,为使研究期内统计口径一致,合并与保留两者共存的 29 个行业。其中,对制造业行业类型划分借助刘清春等[25]的研究。

1.2　研究方法

1.2.1　碳排放核算　由于不同省域制造业能源消费类别不同,难以获得统一数据。因此,本文采用能源消费量、能耗排放 CO_2 系数进行核算,其中 CO_2 排放系数参考 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》。具体核算公式为:

$$C_i = \sum_{k=1}^{29} C_k = \sum_{m=1}^{v} H_{km} \times F_{km} + H_{kd} \times F_{kd} + H_{kr} \times F_{kr} \quad (1)$$

式中:C_i 为第 i 省制造业碳排量(10^4 t),$i=1,2,\cdots,30$;C_k 为制造业第 k 行业碳排量(10^4 t),$k=1,2,\cdots,29$;H_{km}是制造业第 k 行业第 m 种化石能源消费量(10^4 t);F_{km}是第 k 行业第 m 种化石能源 CO_2 排放系数;H_{kd}、H_{kr}分别为制造业第 k 行业电力、热力的消费量(10^4 t);F_{kd}、F_{kr}分别为制造业第 k 行业电力、热力 CO_2 排放系数。其中,由于各个省域历年的区域电网平均碳排放因子存在差异,因此 F_{kd}存在年度及省域差异。

1.2.2　Kaya 恒等式　Yoichi Kaya 在探索碳排放影响因素中提出了 Kaya 恒等式[26-27],并对其进行分解,分解后表达式为:

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \quad (2)$$

式中:C 为碳排量(10^4 t);E 为能源消费量(10^4 t);GDP 为国内生产总值(10^4 万元);P 为人口规模(10^4 人);分别为能源碳强度,单位 GDP 能耗以及人均 GDP。本文选取了能反应绿色制造进程中的经济规模、产业结构、能源强度、能源碳排放 4 个因素构建制造业碳排放恒等式,并将 Kaya 恒等式进行改写,使其适用于本研究,表达式如下:

$$C = \sum_{k=1}^{19} GDP \times \frac{GDP_k}{GDP} \times \frac{E_k}{GDP_k} \times \frac{C_k}{E_k} = \sum_{k=1}^{n} GDP \times A_k \times B_k \times D_k \quad (3)$$

式中:k 为制造业第 k 行业,$k=1,2,\cdots,29$;GDP 为经济总产值(10^4 万元);GDP_k、E_k、C_k 分别为制造业第 k 行业的经济总产值(10^4 万元),能源消费量(10^4 t)以及碳排量(10^4 t);$\frac{GDP_k}{GDP}=A_k$为制造业第 k 行业经济总产值与整体制造业经济总产值比值;$\frac{E_k}{GDP_k}=B_k$、$\frac{C_k}{E_k}=D_k$ 分别为制造业第 k 行业能源强度以及能源碳强度。

1.2.3　LMDI 分解模型　LMDI 分解模型包括加法(LMDI-Ⅰ)和乘法(LMDI-Ⅱ)2 种形式,并分别对应数量与强度研究[19],两者在形式上存在显著差异,但本质上是一致的,且可以相互转化。本文采用 LMDI-I 加法形式,把“30 个省”的“29 个制造行业”生产所消耗的“m 种能源”所产生的碳排放进行定量分解研究[28-29]。

定义制造业碳排放变化为 C,据 Kaya 恒等式因素分解模型,制造业碳排放变化受经济规模 $\triangle C_G$、产业结构 $\triangle C_A$、能源强度 $\triangle C_B$、能源碳强度 $\triangle C_D$ 4 个因素的影响,因此,驱动因素分解如下:

$$\triangle C = C^t - C^0 = \triangle C_G + \triangle C_A + \triangle C_B + \triangle C_D \quad (4)$$

据 LMDI-I 模型,各分解因素贡献值表达式如下:

$$\triangle C_G = \sum_{k=1}^{n} W_k \ln \frac{P^t}{P^0} \quad (5)$$

$$\triangle C_A = \sum_{k=1}^{n} W_k \ln \frac{A_k^t}{A_k^0} \quad (6)$$

$$\triangle C_B = \sum_{k=1}^{n} W_k \ln \frac{B_k^t}{B_k^0} \quad (7)$$

$$\triangle C_D = \sum_{k=1}^{n} W_k \ln \frac{D_k^t}{D_k^0} \quad (8)$$

$$W_k = \frac{C_k^t - C_k^0}{\ln C_k^t - \ln C_k^0} \quad (9)$$

式中：$\triangle C$ 为 t 年间制造业碳排放变化量；C^0 为研究范围内基期制造业碳排量（10^4 t）；C^t 为末期制造业碳排量（10^4 t）；$\triangle C_G$为经济总产值（GDP）的变化对 $\triangle C$ 的贡献，即制造业碳排放的经济规模效应；$\triangle C_A$ 为产业结构的变化对 $\triangle C$ 的贡献，即制造业碳排放的结构效应；$\triangle C_B$ 为能源强度的变化对 $\triangle C$ 的贡献，即制造业碳排放的技术效应；$\triangle C_D$ 为能源碳强度的变化对 $\triangle C$ 的贡献；W_k 为 k 行业的权重。

2　研究结果

2.1　中国制造业碳排放时空演变特征

采用 Quartile 分类法，将 2006—2015 年间中国制造业碳排放划分为低值区、较低值区、较高值区、高值区 4 个类型（图 1）。研究发现：

2006—2015 年间，中国制造业碳增量超过 1.26×10^9 t。其中，除北京外，其余省域制造业碳排放均呈现不同程度地增长。尤其是河北、江苏以及四川，碳增量均超过 1.13×10^8 t。10 a 间，制造业碳排放低值、较低值省域不断减少，而高值区呈现由华北平原向中部、西部省域演进的特征。2006 年，全国制造业碳排放处于低值、较低值省份有 20 个，处于高值区的省份为河北、山东、江苏以及山西。至 2015 年，全国仅有北京、海南、宁夏等 10 个省份碳排放处于低值、较低值区，而高值区省份增加了中部的河南、湖北、安徽以及西部的四川和东北的辽宁省。

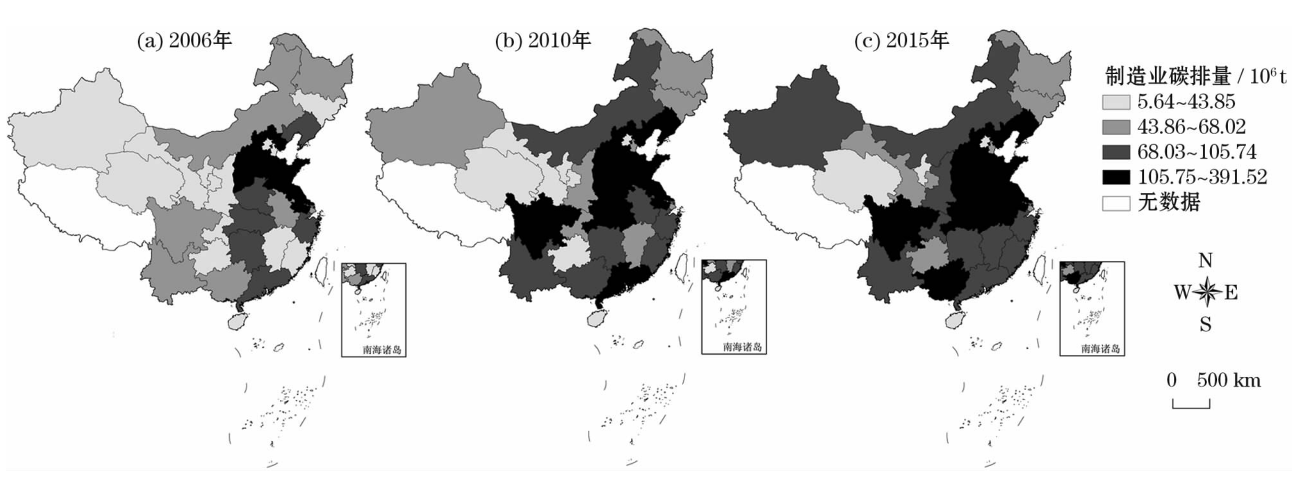
2.2　中国不同类型制造业碳排放时空演变特征

据刘清春等[25]的研究，将 29 个制造行业依据要素密集度划分为资金、技术、劳动力密集型 3 类（表 1）。并将 3 类制造业 2006 年、2010 年、2015 年碳比重（资金、技术、劳动力密集型制造业碳排放占全国制造业的比重）进行测算，对比发现（表 2）：

首先，2006—2015 年间，资金、技术、劳动力密集型制造业碳排放差异显著。其中，碳比重形成资金密集型高于技术密集型高于劳动力密集型制造业，且资金密集型制造业碳比重呈上升趋势，技术密集型碳比重下降幅度高于劳动力密集型。其次，由行业类型划分可知，资金密集型主要为黑色金属加工等一系列重工行业，产业生产能耗高，使得碳排放居高不下。技术密集型制造业碳比重下降趋势最显著，但其碳增量却相对较高。劳动力密集型制造业以纺织等轻工业为主，能源依赖度相对较低，能耗低，导致碳排放相对较低[30]。

采用 Quartile 分类法，将 2006—2015 年间中国不同类型制造业碳排放划分为低值区、较低值区、较高值区、高值区 4 个类型（图 2）。研究发现：

（1）10 a 间，资金密集型（Ⅰ类）制造业碳排放



审图号：GS（2016）1600 号

图 1　制造业碳排放空间分布格局

Fig. 1　Spatial pattern of carbon emissions in manufacturing industry

表 1　制造业类型划分

Tab. 1　Manufacturing industry classified according to factor density

划分类型	制造业行业部门
资金密集型（Ⅰ）	石油冶炼加工业、非金属矿物加工业、黑色金属冶炼制品业、有色金属冶炼加工业、金属制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、仪器仪表及文化办公用品制造业，合计 8 个行业。
技术密集型（Ⅱ）	橡胶与塑料制造业、化学纤维制造业、医药制造业、化学原料制造业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业、计算机通信和其他电子设备制造业、工艺品及其他制造品、废弃资源综合利用制造业，合计 9 个行业。
劳动力密集型（Ⅲ）	农副食品加工业、食品制造业、饮料制造业、纺织业、服装制品业、皮革—毛皮—羽毛（绒）制品业、木料加工制品业、家具制造业、造纸及纸制品业、印刷和记录媒介复制业、文教体育用品制造业、烟草制品业，合计 12 个行业。

表 2　不同类型制造业占制造业碳排放比重

Tab. 2　Proportion of different types of manufacturing industry in carbon emission of manufacturing industry

年份	碳排放占制造业碳排放比重 / %		
	资金密集型（Ⅰ）	技术密集型（Ⅱ）	劳动力密集型（Ⅲ）
2006 年	85.1	9.1	5.8
2010 年	87.8	8.0	4.2
2015 年	89.0	6.9	4.1

除北京下降外，其余省域均呈上升趋势（图 2a ~ 2c）。在空间分布格局中，资金密集型制造业碳排放呈现区域集聚的特征。碳排放高值区由 2006 年的“单核心”演变为 2015 年“多核心”，“热点”省域增加了中部的江西以及西部的广西、四川。而环渤海湾的冀鲁辽以及山西、江苏一直处于碳排放“热点”区。10 a 间，资金密集型制造业碳排放处于低值区的省域不断减少，一直处于“冷点”区的省域为宁夏、青海、海南以及北京。此外，研究发现，资金密集型制造业碳排放空间分布格局演变特征与整体制造业趋于一致，表明其碳排放是影响整体制造业碳排放时空演变的关键因素。

（2）10 a 间，63% 的省域技术密集型（Ⅱ类）制造业碳排放呈增长趋势（图 2d ~ 2f）。其中，新疆碳增量最高，超过了 1.46×10^7 t，山东碳排放负增长最显著。此外，资金密集型制造业碳排放高值区由 5 个增至 9 个，且在空间分布格局上呈现由东部沿海向中、西部省域带状延伸的演进特征。而西部碳排放除新疆、四川较高外，整体偏低。

（3）10 a 间，57% 的省域劳动力密集型（Ⅲ类）制造业碳排放呈现不同程度的降低（图 2g ~ 2i）。其中，广东负增长最显著，超过了 -0.98×10^7 t，而江苏碳增长极为突出，超过了 2.39×10^7 t。劳动力密集型制造业碳排放整体呈现由东部、东南沿海向西北内部递减的趋势。东部沿海的苏浙鲁、中部的湖南碳排放始终处于高值区。此外，高碳排放部分省域呈现由东、中部向西部转移的趋势，如黑龙江、广东与河南碳排放不断降低，而西部的四川则进入碳排放热点区。

2.3　中国制造业碳排放驱动因素省域差异研究

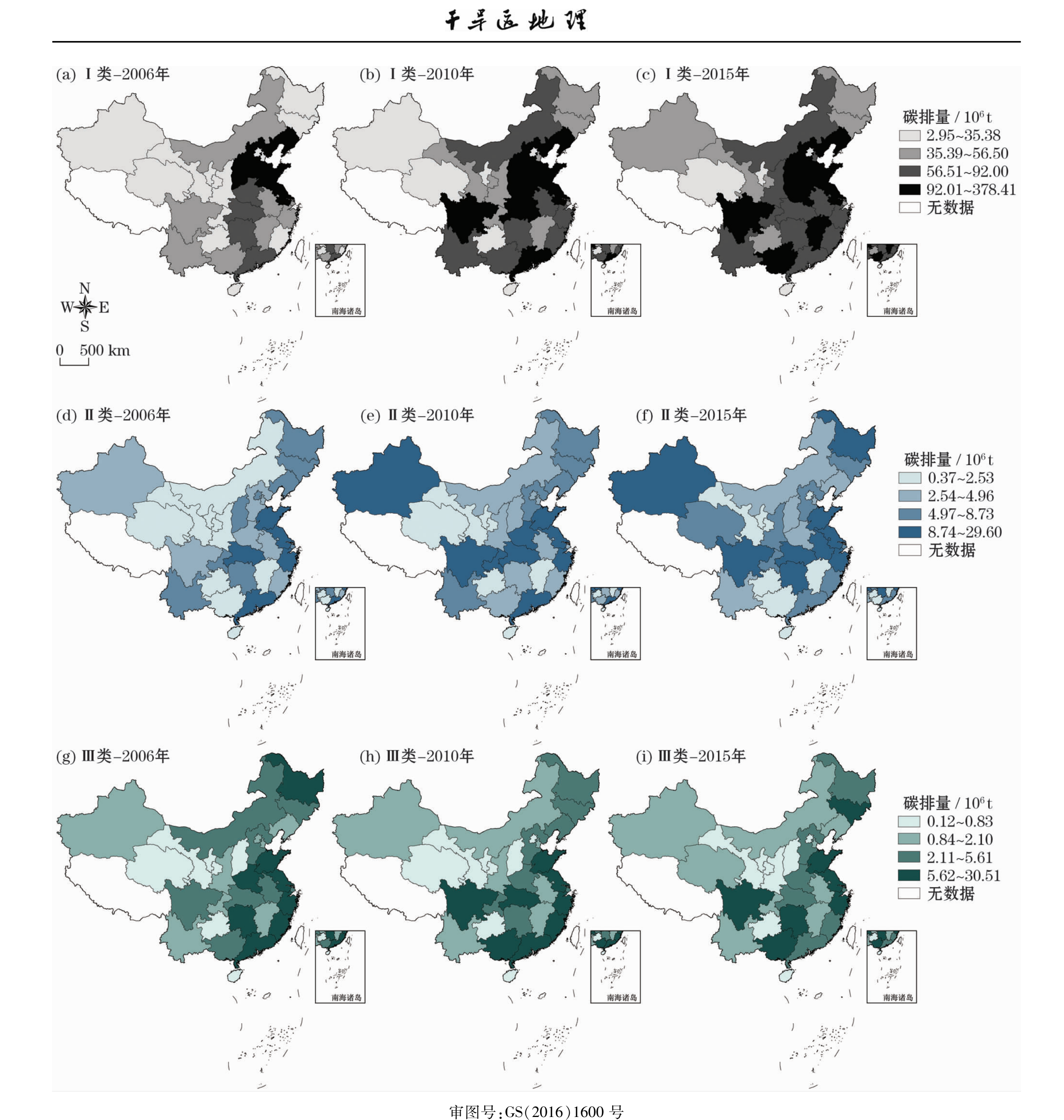
据 Kaya 恒等式，将制造业碳排放时空演变驱动因素划分为经济规模、产业结构、能源强度与能源碳强度 4 类，通过 LMDI-I 模型对 4 个驱动因子贡献值进行测算，结论如下（图 3）：

首先，2006—2015 年间，中国制造业碳增量呈现东高西低的分布格局。其中，东部地区河北、江苏碳增量较高且尤为突出，而西部地区除四川、陕西、广西和新疆外，整体碳增量较低。制造业经济规模扩张是碳增长的首要因素，其贡献值超过 3.17×10^9 t，其次能源碳强度的提高对制造业碳增量的贡献值超过 0.7×10^7 t。制造业能源强度的降低是导致碳减排的主要因素，其贡献值约 -1.74×10^9 t，而制造业产业结构的调整对碳减排的贡献值仅为 -0.16×10^9 t。

其次，制造业经济规模扩张与各省制造业碳排放均存在显著的正相关关系。尤其是河北、山东、江苏以及河南，结合 GDP 数据可以发现，此 4 省制造业经济发展程度均较高。目前，中国制造业仍处于规模报酬递增阶段，生产规模的扩张势必导致能耗增加，进而导致碳排放的增加。制造业产业结构的调整导致 47% 的省域碳减排，而福建、安徽、贵州由于产业结构重碳化，导致碳排放存在较高增长。制造业能源强度的变化除上海外，其余省域均导致碳减排。这是因为相较于 2006 年，2015 年上海单位 GDP 产生的能耗显著增加。制造业能源碳强度的变化导致碳增排的省域显著高于碳减排省域，其中湖南、安徽、四川、贵州和黑龙江，由于石油资源禀赋水平较高，形成较强资源路径依赖，使得重碳化的能源消费结构难以改变，致使碳排放居高不下。

2.4　中国不同类型制造业碳排放驱动因素省域差异研究

2.4.1　经济规模效应　2006—2015 年间，资金、技术与劳动力密集型制造业经济规模扩张均对其自身碳排放产生积极作用。采用 Jenks 分级法，将不同



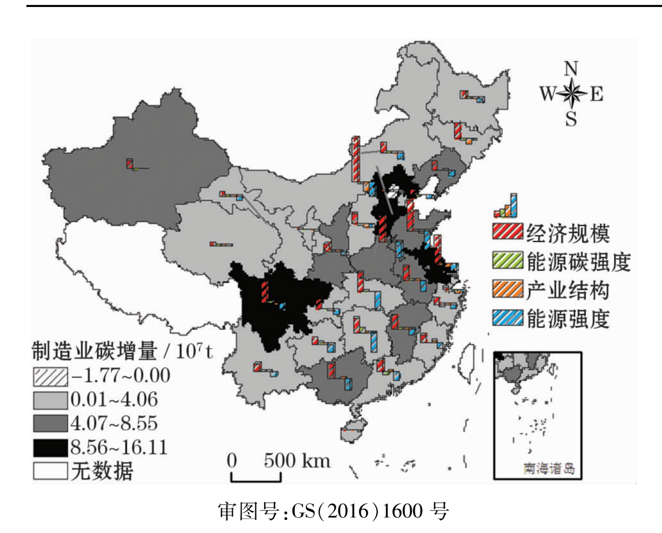
审图号:GS(2016)1600 号

图 2　不同类型制造业碳排放空间分布格局

Fig. 2　Spatial patterns of carbon emissions of different types of manufacturing industry

类型制造业经济规模扩张对省域碳排放贡献值划分 4 个等级。其中,资金密集型制造业经济规模扩大对其碳增长的贡献值呈现显著的东西差异,且高值区呈现区域集聚特征(图 4a)。尤其冀豫鲁苏 4 省,贡献值均超过 2.09×10^8 t,而西部地区除四川外,整体贡献值均较低。技术密集型制造业经济规模扩张对其碳增长贡献高值区主要分布于东部沿海的山东、江苏以及中部的湖北,其贡献值均超过 1.99×10^7 t(图 4b)。而劳动力密集型制造业经济规模的扩大对其碳增长较高的省域是山东、江苏与吉林,贡献值均超过 1.4×10^7 t(图 4c)。

此外,研究发现,不同类型制造业经济规模扩张越大,并不证明其导致的碳增量就越越高。还与其产业结构调整是否合理、能源消费结构有否改善以及生产技术水平是否提高等因素紧密相关。如 10 a 间,广东与湖南资金密集型制造业经济规模扩张处



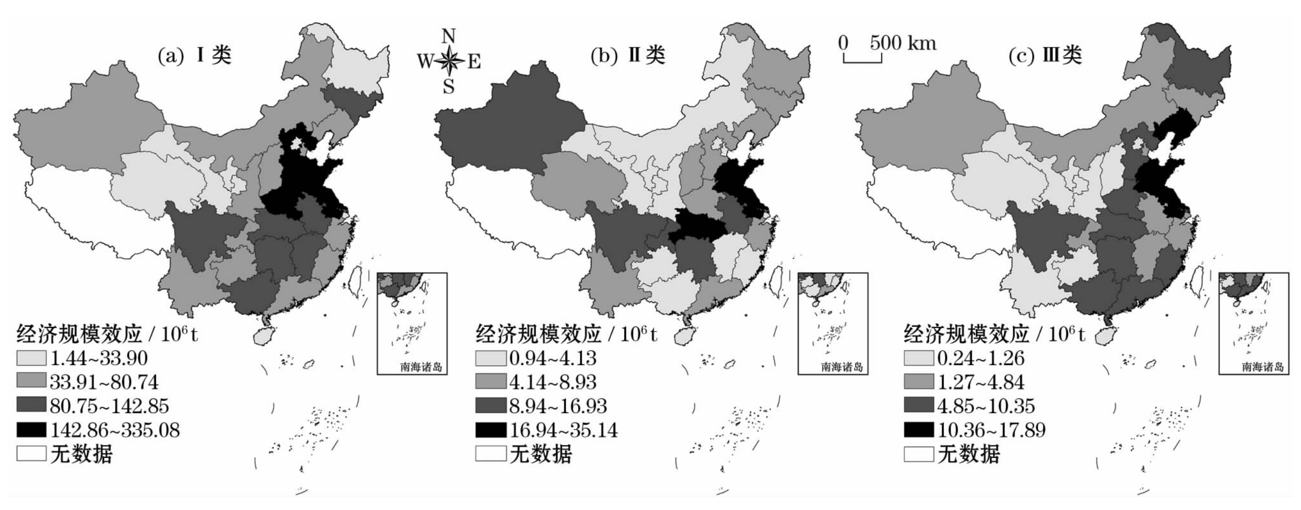
审图号：GS(2016)1600 号

图 3　制造业碳排放驱动因素贡献值

Fig. 3　Contribution value of manufacturing industry carbon emissions drivers

于前列，但其所导致的碳增长却处于相对较低水平。这主要是因为广东与湖南资金密集型制造业发展基础较好，生产技术较先进，使得单位产值能耗相对较少，故经济规模扩张所带来的碳增量相对较低。反之，河北由于煤炭资源禀赋水平高，能源消费结构重碳化显著，使得其资金密集型制造业经济规模扩张相对较小，碳增量却相对较高。

2.4.2　产业结构效应　2006—2015 年间，不同类型的制造业产业结构变化对碳排放具有双向作用。其中，资金密集型制造业产业结构变化带来的负效应主要存在于东部、东北部省域，西部除新疆外，均为积极作用（图 5a）。技术密集型制造业产业结构变化主要导致东部、北部省域碳增长，其中，湖北、山东碳增长较显著。而西南、南部沿海省域负向作用



审图号：GS(2016)1600 号

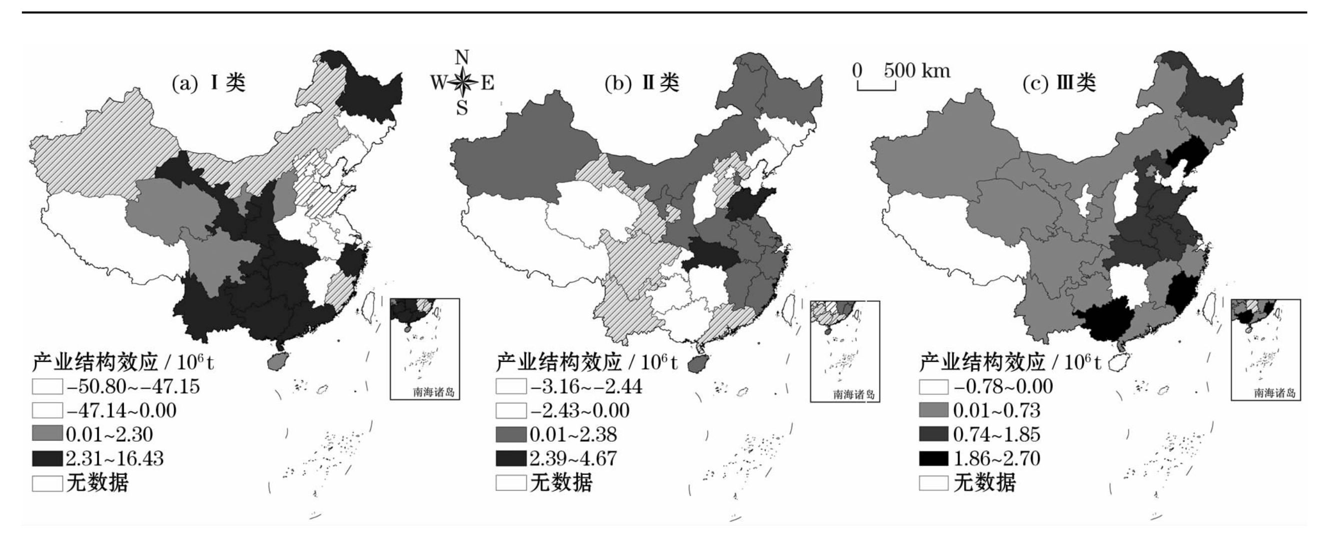
图 4　经济规模对不同类型制造业碳排放影响

Fig. 4　Impact of economic scale on carbon emissions of different types of manufacturing industry

较明显（图 5b）。劳动力密集型制造业产业结构调整带来的碳增长较明显。其中，除上海、山西、宁夏、海南、湖南以及天津外，均为正效应（图 5c）。

此外，研究发现，非金属矿物制品业的发展是导致资金密集型制造业碳增长的重要因素，尤其是贵州、云南与山西。导致山东、湖北技术密集型制造业碳增排主要是由于化学原料制品业的发展。而导致绝大多数省域劳动力密集型制造业碳增排的主要行业是农副食品加工业。这表明非金属矿物制品业、化学原料制品业以及农副食品加工业在发展“量”的同时，需更加注重对“质”的追求。

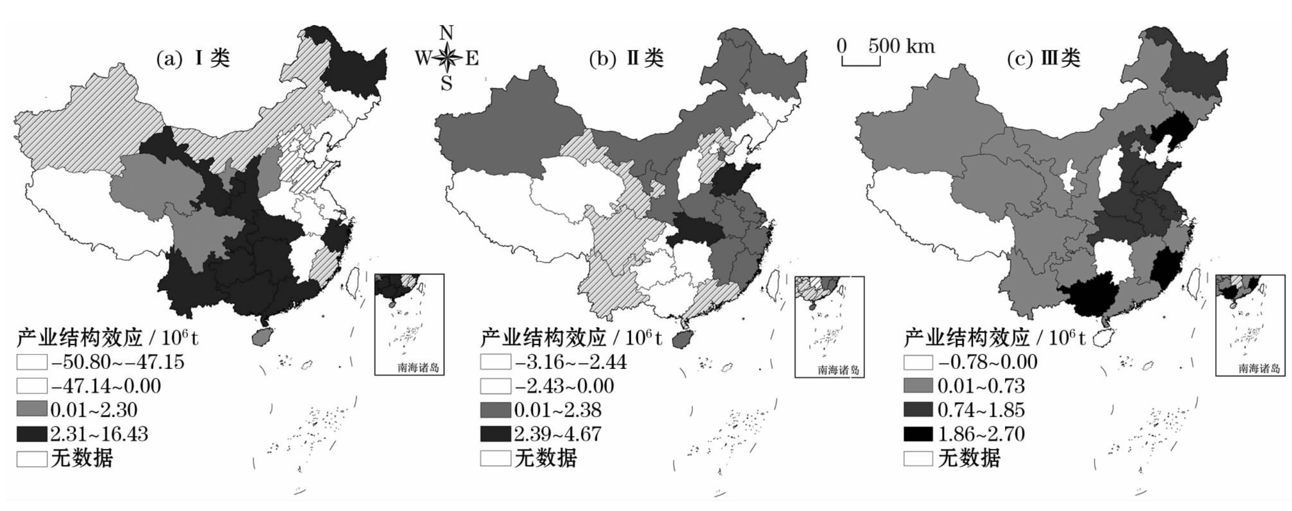
2.4.3　能源强度效应　2006—2015 年间，除上海、辽宁和新疆外，资金密集型制造业能源强度变化均导致省域碳减排（图 6a）。其中，导致上海、辽宁碳排放增长的主要原因是黑色金属加工业单位 GDP 能耗增加，新疆则是石油冶炼加工业单位 GDP 能耗有所提高，这表明其需改善生产技术，降低能耗。技术密集型制造业能源强度变化均导致省域碳减排，这由于其行业具有较先进的生产技术，使得能耗有所降低，实现经济效益提高与碳减排的双赢（图 6b）。劳动力密集型制造业单位 GDP 能耗提高的省域为江苏、宁夏（图 6c）。其中江苏的烟草制品业、纺织业、服装制造业单位 GDP 能耗均有所增加。相较 10 a 前，此类行业劳动力成本大幅度提高，使 GDP 增速有所下降，但其生产过程的能耗并未降低，最终使单位 GDP 能耗增加，碳排放呈上升趋势。



审图号:GS(2016)1600 号

图 5　产业结构对不同类型制造业碳排放影响

Fig. 5　Effect of industrial structure on carbon emissions of different types of manufacturing industry



审图号:GS(2016)1600 号

图 6　能源强度对不同类型制造业碳排放影响

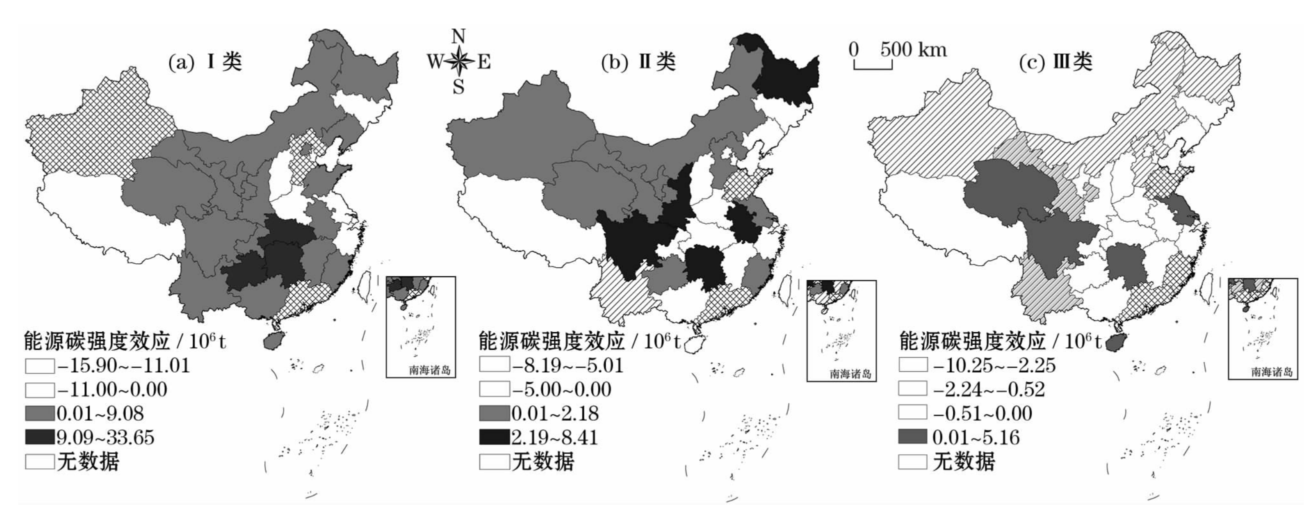
Fig. 6　Effect of energy intensity on carbon emissions of different types of manufacturing

2.4.4　能源碳强度效应　2006—2015 年间,资金密集型制造业能源碳强度变化导致碳增排的省域显著高于碳减排省域(图 7a),尤其是湖南、贵州、湖北 3 省,其能源碳强度的提高导致的碳增量均超过 1.59×10^7 t。其中,非金属矿物制品业、黑色金属加工业能源碳强度提高尤为显著,其能源消费的重碳化矛盾进一步突出。技术密集型制造业能源碳强度变化导致碳增长的省份主要为湖南、安徽、四川、黑龙江以及陕西(图 7b)。其中,塑料与橡胶制品业、化学原料制品业的发展增加了碳减排压力。劳动力密集型制造业能源碳强度变化具有显著的碳减排作用(图 7c),尤其是山东、广东、河南与浙江。其中,纺织业、造纸及纸制品业、农副食品加工业能源碳强度降低幅度较高。能源碳强度的提高导致碳增排的省域主要为湖南、江苏、青海与海南,而这一结果主要是由家具制造业、纺织服装业的发展,导致能耗的增加,进而使得碳排放增加。

3　结 论

通过对 2006—2015 年间中国制造业、不同类型制造业碳排放时空演变特征分析,并运用 LMDI-I 模型对制造业、不同类型制造业碳排放驱动因素进行探究,结论如下:

(1) 制造业碳排放时空演变特征极为显著。10 a 间,除北京外,其余省域制造业碳排放显著增加。碳排放低值、较低值区呈现空间收缩,而高值区



审图号:GS(2016)1600 号

图 7　能源碳强度对不同类型制造业碳排放影响

Fig. 7　Effect of energy carbon intensity on carbon emissions of different types of manufacturing

则呈现由华北平原不断向中、西部省域推进的演化特征。在不同类型的制造业中,资金密集型制造业碳排放显著高于技术与劳动力密集型。其中,资金与技术密集型制造业"热值"区均呈现东部向中、西部省域演进的特征,而劳动力密集型制造业"热值"区则呈现东、中部向西部演替的特征。

(2)制造业碳排放驱动因素作用方向与强度均有差异。经济规模扩张是导致各省制造业碳增长的首要因素,其中,资金密集型制造业经济规模扩张所带来的碳增长最显著。产业结构调整对制造业碳减排的贡献值较低,除资金密集型制造业外,技术与劳动力密集型制造业产业结构调整均导致碳增长。能源强度的减低对制造业,尤其是技术密集型制造业碳减排效果明显。而能源碳强度的提高对资金以及技术密集型制造业的碳减排造成较大压力。

(3)实现制造业低碳、可持续发展任重而道远。首先,对制造业碳排放的关注度应东部高于中部、西部省域,而对资金密集型制造业碳排放的关注度应高于技术与劳动力密集型。其次,不同类型制造业经济规模的扩张应以可持续发展为前提,以技术创新为导向,降低单位能耗。再次,不同类型的制造业,尤其是技术与劳动力密集型制造业的产业结构亟需合理调整,降低对高耗能、高碳排放制造行业的经济依赖度。此外,制造业在生产过程中,应改善能源消费结构,提高对清洁、可持续能源利用强度。最后,在制定制造业碳减排具体措施时,各省、各类型制造业应结合具体情况,切忌"一刀切",从而高效率地实现制造业碳减排。

参考文献(References)

[1] 国务院. 中国制造 2025[Z]. 2015 - 05 - 08. [State Council. Made in China 2025[Z]. 2015 - 05 - 08.]

[2] 原嫄,席强敏,孙铁山,等. 产业结构对区域碳排放的影响——基于多国数据的实证分析[J]. 地理研究,2016,35(1):82 - 94. [YUAN Yuan,XI Qiangmin,SUN Tieshan,et al. The impact of the industrial structure on regional carbon emission:Empirical evidence across countries[J]. Geographical Research,2016,35(1):82 - 94.]

[3] GUAN D B,KLASEN S,HUBACEK K,et al. Determinants of stagnating carbon intensity in China[J]. Nature Climate Change,2014,4(11):1017 - 1023.

[4] LIU Z,FENG K S,DAVIS,S J,et al. Understanding the energy consumption and greenhouse gas emissions and the implication for achieving climate change mitigation targets[J]. Applied Energy,2016,184:737 - 741.

[5] LIU Z,GUAN D B,MOORE S,et al. Steps to China's carbon peak[J]. Nature,2015,522(7556):279 - 281.

[6] 陈占明,吴施美,马文博,等. 中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的 STIRPAT 模型[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):45 - 54. [CHEN Zhanming,WU Shimei,MA Wenbo,et al. Driving forces of carbon dioxide emission for China's cities:Empirical analysis based on extended STIRPAT model[J]. China Population,Resources and Environment,2018,28(10):45 - 54.]

[7] 刘晓婷,陈闻君. 基于 ESDA-GIS 的新疆能源碳排放空间差异动态演化分析[J]. 干旱区地理,2016,39(3):678 - 685. [LIU Xiaoting,CHEN Wenjun. Dynamic evolution of spatial disparity of energy carbon emissions in Xinjiang based on ESDA-GIS[J]. Arid Land Geography,2016,39(3):678 - 685.]

[8] 李富佳. 区际贸易隐含碳排放转移研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2018,37(10):1303 - 1313. [LI Fujia. Progress and prospects of research on transfer of carbon emissions embodied in

inter-regional trade[J]. Progress in Geography,2018,37(10):1303－1313.]

[9] PAN W,PAN W L,SHI Y,et al. China's inter-regional carbon emissions:An input-output analysis under considering national economic strategy[J]. Journal of Cleaner Production,2018,19(7):148－160.]

[10] 刘爱东,刘文静,曾辉祥. 行业碳排放的测算及影响因素分析——以10个国家对华反倾销涉案为例[J]. 经济地理,2014,34(3):127－135.[LIU Aidong,LIU Wenjing,ZENG Huixiang. Carbon emissions measure and influencing factors involved in the anti:Dumping industry from ten countries[J]. Economic Geography,2014,34(3):127－135.]

[11] 董棒棒,李莉,唐洪松,等. 环境规制、FDI与能源消费碳排放峰值预测——以西北五省为例[J]. 干旱区地理,2019,42(3):689－697.[DONG Bangbang,LI Li,TANG Hongsong,et al. Environmental regulation,FDI and energy consumption peak carbon emissions forecast:A case of five provinces in northwest China[J]. Arid Land Geography,2019,42(3):689－697.]

[12] 傅京燕,张春军. 国际贸易、碳泄漏与制造业 CO_2 排放[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(3):13－18.[FU Jingyan,ZHANG Chunjun. International trade,carbon leakage and CO_2 emissions of manufacturing industry[J]. China Population,Resources and Environment,2014,24(3):13－18.]

[13] 黄凌云,谢会强,刘冬冬. 技术进步路径选择与中国制造业出口隐含碳排放强度[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(10):94－102.[HUANG Lingyun,XIE Huiqiang,LIU Dongdong. Study on impacts of technological progress paths on embodied carbon emission intensity of Chinese manufacturing exports[J]. China population,Resources and Environment,2017,27(10):94－102.]

[14] 马晓微,石秀庆,王颖慧,等. 中国产业结构变化对能源强度的影响[J]. 资源科学,2017,39(12):2299－2309.[MA Xiaowei,SHI Xiuqing,WANG Yinghui,et al. Impacts of industrial structural change on energy intensity in China[J]. Resources Science,2017,39(12):2299－2309.]

[15] 刘博文,张贤,杨琳. 基于LMDI的区域产业碳排放脱钩努力研究[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(4):78－86.[LIU Bowen,ZHANG Xian,YANG Lin. Decoupling efforts of regional industrial development on CO_2 emissions in China based on LMDI analysis[J]. China Population,Resources and Environment,2018,28(4):78－86.]

[16] 邵帅,张曦,赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. 中国工业经济,2017,(3):44－63[SHAO Shuai,ZHANG Xi,ZHAO Xingrong. Empirical decomposition and peaking pathway of carbon dioxide emissions of China's manufacturing sector:Generalized divisia index method and dynamic scenario analysis[J]. China Industrial Economics,2017,(3):44－63.]

[17] 李雪梅,郝光菊,张庆. 天津市高碳排放行业碳排放影响因素研究[J]. 干旱区地理,2017,40(5):1089－1096.[LI Xuemei,HAO Guangju,ZHANG Qing. Influencing factors of high-emission for industrial sub-sectors in Tianjin[J]. Arid Land Geography,2017,40(5):1089－1096.]

[18] 王长建,张小雷,张虹鸥,等. 基于IO-SDA模型的新疆能源消费碳排放影响机理分析[J]. 地理学报,2016,71(7):1105－1118.[WANG Changjian,ZHANG Xiaolei,ZHANG Hongou,et al. Influencing mechanism of energy-related carbon emissions in Xinjiang based on IO-SDA model[J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(7):1105－1118.]

[19] 张艳平,张丽君,崔盼盼,等. 中国居民碳排放时空特征及影响因素研究[J]. 干旱区地理,2018,41(2):401－408.[ZHANG Yanping,ZHANG Lijun,CUI Panpan,et al. Patial and temporal characteristics of Chinese residents' carbon emissions and its influencing factors[J]. Arid Land Geography,2018,41(2):401－408.]

[20] 孙艳伟,李加林,李伟芳,等. 海岛城市碳排放测度及其影响因素分析——以浙江省舟山市为例[J]. 地理研究,2018,37(5):1023－1033.[SUN Yanwei,LI Jialin,LI Weifang,et al. Estimating the carbon emissions and influencing factors of island city:A case study in Zhoushan Islands,Zhejiang Province[J]. Geographical Research,2018,37(5):1023－1033.]

[21] 张馨. 中国能源消费碳排放的时空差异及驱动因素研究[J]. 干旱区地理,2018,41(5):1115－1122.[ZHANG Xin. Spatial-temporal differences and driving factors of carbon emission from energy consumption in China[J]. Arid Land Geography,2018,41(5):1115－1122.]

[22] 汪菲,王长建. 新疆能源消费碳排放的多变量驱动因素分析——基于扩展的STIRPAT模型[J]. 干旱区地理,2017,40(2):441－452.[WANG Fei,WANG Changjian. Examining the driving factors of energy related carbon emissions using the extended STIRPAT model based on IPAT identity in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2017,40(2):441－452.]

[23] 程叶青,王哲野,张守志,等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报,2013,68(10):1418－1431.[CHEN Yeqing,WANG Zheye,ZHANG Shouzhi,et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Grographica Sinica,2013,68(10):1418－1431.]

[24] 崔盼盼,张艳平,张丽君,等. 中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析[J]. 自然资源学报,2018,33(5):879－892.[CUI Panpan,ZHANG Yanping,ZHANG Lijun,et al. Analysis on the spatial and temporal evolution of indirect carbon emissions and its driving mechanism in China[J]. Journal of Natural Resources,2018,33(5):879－892.]

[25] 刘清春,张莹莹,李传美. 基于空间杜宾模型的山东省制造业时空分异研究[J]. 地理科学,2017,37(5):691－700.[LIU Qingchun,ZHANG Yingying,LI Chuanmei. Spatial pattern change of manufacturing industry in Shandong Province based on spatial durbin model[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(5):691－700.]

[26] LIU Jun,FENG Tingting,YANG Xi. The energy requirements and carbon dioxide emissions of tourism industry of western China:A

case of Chengdu City[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15(6):2887 -2894.
[27] SCHIPPER Lee, SAENGER Calanit, ANANT Sudardshan, et al. Transport and carbon emissions in the United States:The long view [J]. Energies,2011,4(4):563 -581.
[28] WU Libo, KANEKO Shinji, MATSUOKO Shunji. Driving forces behind the stagnancy of China's energy-related CO_2 emissions from 1996 to 1999:The relative importance of structural change, intensity change and scale change[J]. Energy Policy,2005,(33):319 -335.
[29] WU Libo, KANEKO Shinji, MATSUOKO Shunji. Dynamics of energy-related CO_2 emissions in China during 1980 to 2002:The relative importance of energy suppcy-side and demand-side effects [J]. Energy Policy,2006,(34):3549 -3572.
[30] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. 中国社会科学,2012,(3):78 -94,206 -207. [TU Zhengge. China's carbon emission reduction path and strategic choice: Index decomposition analysis of carbon emissions based on eight major industries[J]. Social Sciences in China,2012,(3):78 -94,206 -207.]

Spatial-temporal evolution on the manufacturing industry's carbon emission and its driving factor in China

WANG Xia[1,2], ZHANG Li-jun[1,2], QIN Yao-chen[1,2], ZHANG Jing-fei[1,2]

(1 *College of Environment and Planning*, *Henan University*, *Kaifeng* 475004, *Henan*, *China*;
2 *Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow Region*, *Henan University*, *Kaifeng* 475004, *Henan*, *China*)

Abstract: This paper is based on the energy consumption data of manufacturing industries from 2006 to 2015 to determine the carbon emissions in 30 provinces of China (except for Hong Kong, Macao, Taiwan, and Tibet because of data shortage). According to the degree of factory intensity, the manufacturing industry was divided into three categories: capital, technology, and labor-intensive. Based on the analysis of the temporal-spatial evolution characteristics of carbon emissions in the manufacturing industry and the different types of manufacturing industry, this study used the Kaya model to divide the driving factors of carbon emissions into four aspects: economic scale, industrial structure, energy intensity, and energy-carbon intensity. Then, the LMDI-I decomposition model was used to quantitatively analyze the driving factors of carbon emissions. The research results show that in addition to Beijing City, the carbon emissions of the manufacturing industry in other provinces showed a growth trend; the carbon emission increment is the highest in capital-intensive manufacturing industries, followed by the technology and labor-intensive manufacturing industries. The effect of expansions of economic scale is a main factor for all provinces and the carbon emissions of various manufacturing industries are increasing. The industrial structure adjustment, energy intensity, and energy-carbon intensity changes have two-way effects on the carbon emissions of all types of manufacturing industries in different provinces and the intensities of the effect are significantly different. Therefore, in the future, the cut-in points of carbon emission reduction in manufacturing industries in different provinces and industries should be different.

Key words: manufacturing industry types; carbon emission; LMDI-I method; China